

液体金属ミスト冷却に関する研究

著者	黒川 政秋
号	1331
発行年	1992
URL	http://hdl.handle.net/10097/10138

氏 名	黒 川 政 秋
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 12 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 56 年 3 月 東北大学大学院工学研究科原子核工学 専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	液体金属ミスト冷却に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 戸田 三 朗 東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 渡邊 博茂 東北大学助教授 橋爪 秀利

論 文 内 容 要 旨

はじめに

磁気閉じ込め型核融合炉においては、高温・高熱流束除熱の必要性に加え、トリチウム生産のために金属リチウムもしくはリチウム化合物をブランケット内に包含させなければならない。このことを考慮すると、核融合第一壁の冷却方式として、液体金属リチウム冷却は非常に有力なものと思われる。しかし、液体金属単相流冷却は、磁場閉じ込め型融合炉においては電磁流体力学 (MHD) 効果による、

- 通常の摩擦損失の数倍に及ぶ圧力損失、とれに伴うポンプ動力の増大
- 乱流抑制 (層流化) による熱伝達率の劣化

等の欠点が指摘されている。このため、代替冷却法として種々の冷却財を用いた様々な冷却方式が提案・検討されてきている。その中で液体金属ミスト冷却は、導電性流体の伝熱流動に対する上述の MHD 効果を、二相流化することで積極的に解決しようとするものである。即ち、液体金属をなんらかの方法で微粒化し、液滴に分散することで前述の MHD 効果の影響を回避すると共に液体金属冷却の持つ優れた冷却特性を強磁場下で活かそうとするものである。本研究はこの液体金属を用いたミスト冷却の熱伝達について、その熱伝達特性と機構を理論と実験の両面から明らかにすることを目的として行われた。本研究の成果は以下のようにまとめることができる。

主な成果

ミスト流は基本的には多数の液滴群から構成されており、単一液滴の挙動を正確に把握しておくことはミスト流の熱伝達を明かにする上で不可欠であるといえる。この立場から、本研究では単一

液滴の衝突時の変形、およびその期間の熱伝達に着目し、以下の検討を行った。

1. 従来の液膜蒸発モデルを、各種液体金属に適用し微小液滴による熱流束の予測計算を行った。その結果、ナトリウム、リチウム、カリウム等の高熱伝導率の液体金属の場合には、 10^7 W/m^2 におよぶ非常に大きな熱流束が達成される可能性があることを示した。計算結果をFig. 1に示す。
2. 単一液滴の衝突現象を解明するために、SOLA-VOF法に基づく数値計算コードを開発し、水、エチルアルコール、水銀を用いた実験と計算値の比較を行い、解析コードの検証を行った。Fig. 2に液膜直径の時間変化の実験値と計算値との比較を、Table 1に実験条件を示す。同図より計算と実験が非常に良く一致していることがわかる。次に、この計算コードを発展させて液膜蒸発モデルでは省略されている液滴が伝熱面上に衝突し液膜が形成される液滴変形過程とその期間の熱伝達のシミュレーションを行った。このシミュレーションではナトリウムの他に比較のために水についても同様な計算を行った。Fig. 3に計算結果の一例を、Table 2に計算条件を示す。このシミュレーションにより以下の現象を明らかにした。

- (1) 液体ナトリウム滴と水滴の衝突現象に大きな差異はなく、ほぼ等しい液膜を形成する。
- (2) 水滴では、液膜形成期間の熱伝達の割合は十分に小さく、液膜形成が完了した後に熱伝達が始まることを仮定する液膜蒸発モデルの妥当性を明らかにした。一方、ナトリウム液滴では、水滴と大きく異なり変形期間中に伝熱面と液滴間の伝熱は完了し、従って、伝熱面温度が液体の飽和温度以下で液体が蒸発しない領域では、100%の顕熱冷却が期待されることになる。飽和温度以上の伝熱面の場合には液滴変形期間中における蒸発の可能性を明らかにした。

このように、本研究により、実験的に調べるのが非常に困難な液体金属滴の衝突変形及びその期間の吸熱過程を数値シミュレーション手法により解析可能であることが明らかとなった。この成果は、他の移動境界を含んだ複雑形状場における熱伝達解析に直接応用することが可能である。

次に、上述の単一液滴の熱伝達解析に基づくミスト流冷却の熱伝達予測を確認するために、液体金属ミスト冷却実験を実施した。実験では液体金属ミスト・二相噴流を、高温の円板状伝熱面に衝突させてミスト冷却の熱伝達特性を調べた。実験は、東北大学工学部原子核工学科原子炉工学研究室に設置されている『液体金属ミスト冷却実験装置』を使用し、液体金属として液体ナトリウムを使用した。実験条件は体系圧力が大気圧で、ミスト流の流動パラメータは、ナトリウム液滴速度がレーザードップラー流速計(LDA)による計測により平均速度 $1.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 、液滴直径が直接サンプリングによる体積平均粒径で約 $250 \mu\text{m}$ 、伝熱面上のナトリウム質量流量密度は $0.2 \sim 2 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の範囲であった。本実験の主な成果は以下のようになる。

3. 従来、ほとんど報告されていない液体金属を用いた噴霧流の流動パラメータ測定を行った。また、良好な噴霧特性を持つニードル型ノズルを開発した。
4. 液体ナトリウムの飽和温度以下の伝熱面温度 ($600 \sim 1000 \text{ K}$)、すなわち強制対流域における熱伝率は、ミスト流中のナトリウム液滴の体積率 f で、 $0.01 \sim 0.1\%$ の付加により熱伝率は単純ガス噴流冷却の場合より大幅に改善され 1 MW/m^2 に近い熱流束が得られた。実験結果を

Fig. 4 と Fig. 5 に示す。液体金属ミスト冷却では、液体金属の質量流量密度が非常に重要であり、特に熱伝達特性に影響する滞留液膜が伝熱面に形成されない条件下では、シミュレーションから予測される100%の顕熱冷却効率、すなわち次式で表される熱伝達率 h となることを確認した。

$$h = W_{Na} C_P$$

伝熱面上に液膜が形成される場合には次式となる。

$$h = \alpha W_{Na} C_P \quad (0 < \alpha < 1)$$

ここで、 W_{Na} はナトリウムの質量流量密度、 C_P は定圧比熱である。また、 α は液膜による熱伝達率の阻害ファクターと考えることができる。実験結果より、伝熱面積が広い場合には、ガ

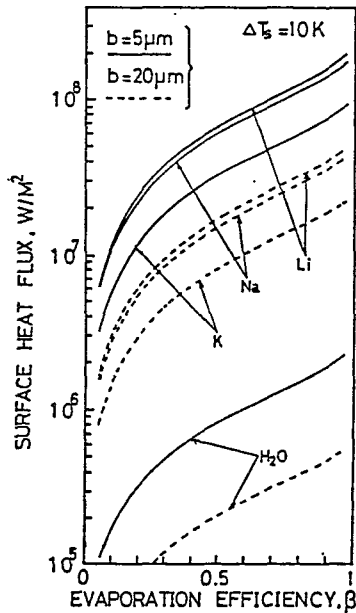


Fig.1 Surface heat flux estimated by dropwise evaporation model for sodium, lithium, potassium and water.

Table 1 Experimental conditions.

	RUN-W1	RUN-W2	RUN-W3
Diameter, mm	2.2	2.3	2.3
Velocity, m/s	2.2	3.4	4.4
Re number	4140	7230	8762
We number	143	351	615

Table 2 Calculation conditions.

	TEST-WA1	TEST-WA2	TEST-WA1	TEST-WA2
FLUID	SODIUM	SODIUM	WATER	WATER
Diameter, mm	0.5	0.3	0.5	0.3
Velocity, m/s	5.0	5.0	5.0	5.0
Re number	8446.0	5068.0	2475.3	1485.2
We number	66.2	39.8	171.6	103.0

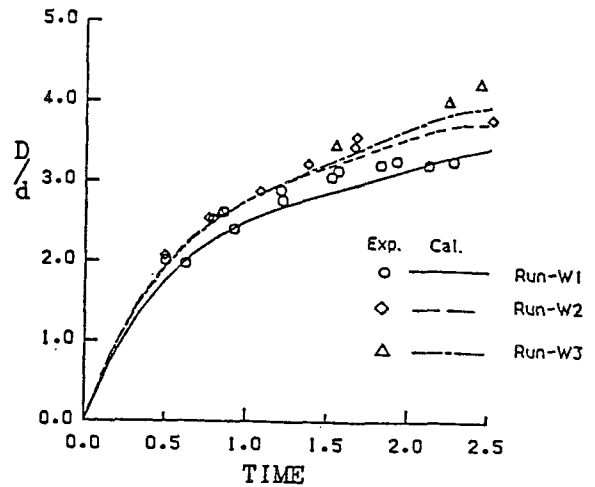


Fig.2 Comparison of the film diameter between numerical results and experimental data for water droplets.

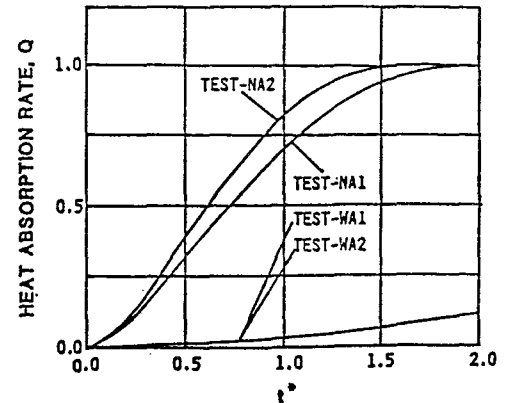


Fig.3 Time variations of heat absorption rate Q .

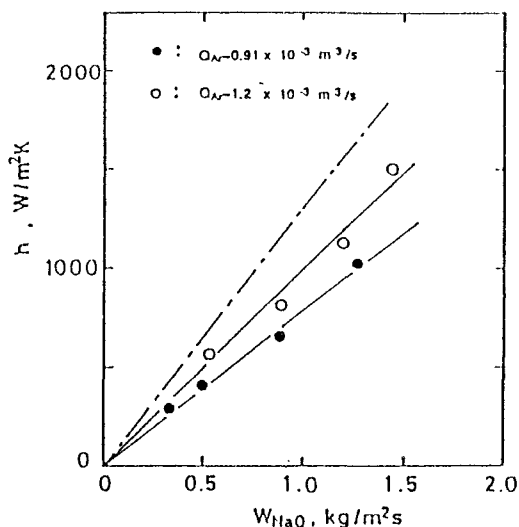


Fig.4 Relationship between Heat transfer coefficient and sodium mass flux density W_{Na} . (Diameter of test target is 100mm)

ス流量の増加により α を増加させることが可能である。これは、伝熱面上に形成される液膜厚さがガス流量の増加により減少する効果と考えることができる。

5. 液体ナトリウムの飽和温度以上の伝熱面 ($1000 \sim 1400K$) の沸騰域では、積極的な液滴蒸発により熱流束が増大し、本実験範囲で最大 $2.5MW/m^2$ に達した。実験結果を Fig. 6 に示す。またナトリウム液滴の蒸発効率 ε は最高約 0.4 であり、水のミスト冷却における蒸発効率とほぼ等しい。なお、最大熱流束は液膜蒸発モデルから予測される熱流束に比較して数分の 1 程度であるが、これは、実験装置の質量流量密度の上限から生じる問題であり、質量流量密度を増加させることにより $10^7 W/m^2$ 程度の熱流束除熱は容易と考えられる。

このように、本実験によって、ミスト冷却の特徴である、気相熱伝達から沸騰蒸発伝達にわたる

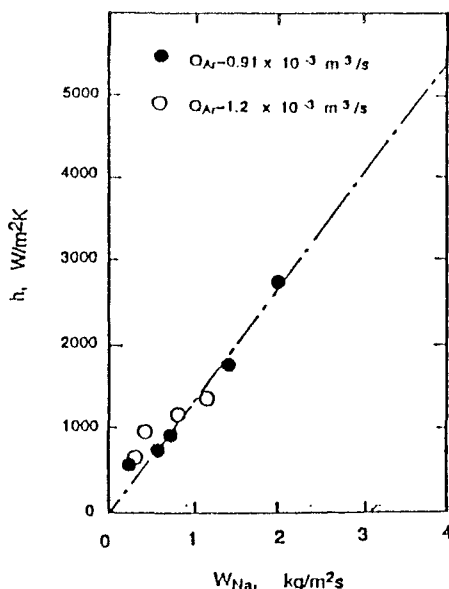


Fig.5 Relationship between Heat transfer coefficient and sodium mass flux density W_{Na} . (Diameter of test target is 20mm)

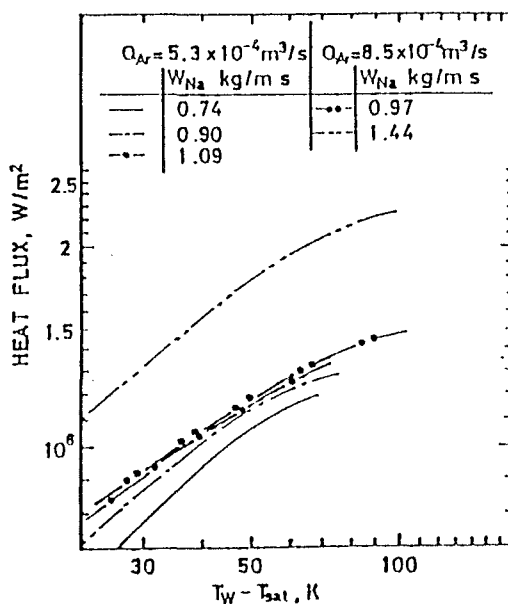


Fig.6 Surface heat flux q in boiling region.

広範囲の伝熱特性を数100K～千100Kの広範囲の高温面上で容易に実現できること、高い熱流束、熱伝達率が得られることを実証した。

以上、本研究によって得られた解析手法、実験手法などにおける新しい知見は今後ますます重要となる、液体金属の伝熱流動、伝熱研究の向上に資するところはきわめて大きいものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

磁場閉じ込め核融合炉の第一壁をはじめとする高熱負荷壁の熱負荷は非常に高く、その冷却には従来技術を越える新しい技術開発が必要である。

本論文は、液体金属を液滴に分散したミスト流を用いることにより、強磁場下で導電性流体に作用する MHD 効果による圧力損失を著しく低減させ、液体金属の持つ優れた高熱負荷冷却特性を損なうことなく活用できる技術として、液体金属ミスト冷却を提案し、その熱伝達特性を実験と理論の両面より明らかにしたもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、従来の研究を概括し、本研究の目的とその重要性を述べている。

第 2 章では、液体金属を液滴に分散させたミスト流による高熱負荷冷却の可能性を、液滴蒸発モデルを適用した解析により検討している。高温面に衝突する液体金属滴により形成される薄液膜の熱伝達により、従来技術をはかるに越える高熱負荷の冷却技術の可能性を示しており、新しい知見である。

第 3 章では、ミスト冷却熱伝達の基本である単一液滴の高温面衝突による滴の変形、液膜の形成、液膜と高温面間の非定常熱伝達の過程を、SORA-VOF 法に基づく数値計算コードを開発して解析している。水等の他種の液滴の場合と比較解析し、高い熱伝導率をもつ液体金属滴では衝突直後の変形期間内に高温面と液滴間の顕熱の熱伝達が完了し 100% の顕熱冷却を期待できること、および液体金属の飽和温度以上の高温面ではこの変形期間中に蒸発熱伝達が生ずる可能性のあることを明らかにしている。この過渡熱伝達の機構は液体金属ミスト冷却の熱伝達特性の基本をなすもので、その成果は重要な知見である。

第 4 章では、以上の単一液滴モデルによる冷却特性の予測を検証するために行った液体金属ミスト冷却実験の成果について述べている。液体ナトリウム液滴・アルゴンガスのミスト噴流を 600～1400 K の円板状高温面に衝突させ、液滴速度、液滴径、および液体金属質量流量密度などの流動パラメータによる熱伝達特性の変化を詳細に調べている。ミスト流中に体積率でわずかに 0.01～0.1% の液体金属滴を付加した実験により、液体金属の飽和温度以下（1000 K 以下）の強制対流では理論予測どおり液体金属質量流量密度に比例して熱伝達率は増加し、ほぼ $1 \text{ MW}/\text{m}^2$ に達する高熱流束が得られることを実証している。さらに飽和温度以上（1000 K 以上）の沸騰域では積極的な液滴蒸発により最高 $2.5 \text{ MW}/\text{m}^2$ に達する高熱流束となることおよびその蒸発効率が 0.4 であることを実証し、液体金属質量流量密度を増加させることによってさらに高熱流束の冷却が可能であることを述べている。

第 5 章では、本冷却の応用上重要な、沸騰を伴わない強制対流域で熱伝達を阻害する滞留液膜の効果について、高温面の面積を変えて行った実験の結果について述べている。広い高温面での熱伝達は、滞留液膜による熱伝達阻害の影響係数を理論予測値に乗じて得られることを明らかにしている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、強磁場下でも MHD 損失を大幅に軽減させ、液体金属の高熱伝達特性を

活用できる液体金属ミスト冷却を提案し，その高熱負荷冷却特性とその機構を理論的に予測し，液体ナトリウムを使用した実験により実証したものであり，原子核工学，特に核融合炉工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。